

# METODE PENINGKATAN KETAHANAN RETAK RESIN POLYESTER DENGAN PENAMBAHAN PROSENTASE VINYL ESTER

Nusyirwan <sup>1)</sup> ✉, Yul Hizhar <sup>1)</sup>, Adam Malik <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Mechanical Engineering Department  
University of Andalas, Limau Maniah  
25163, Padang, West Sumatera, Indonesia  
[Nusyirwan1802@gmail.com](mailto:Nusyirwan1802@gmail.com)  
[yulvartanhyzhar@gmail.com](mailto:yulvartanhyzhar@gmail.com)  
[adammalik@eng.unand.ac.id](mailto:adammalik@eng.unand.ac.id)

## Abstract

*In previous studies, hybrid crash boxes have been developed because it shows better energy absorption characteristics. Circular hybrid crash box combines the advantages of low-density of composite with stable deformation of metal provide a potential energy absorption device. Tests were carried out experimentally and numerically under frontal load. This study aims to determine the energy absorption characteristics of two different configuration of hybrid material compositions using Aluminum Alloy 6063 and T300-epoxy Carbon Fiber composites. Present two typical configurational schemes, namely Al-Ko (i.e. a metal outer tube internally filled with an inner carbon fiber reinforced plastic (CFRP) tube) and Ko-Al (i.e. an outer composite tube internally filled with an inner metal tube). Composite layups arrangement with fiber orientation direction [0,90]10. First, the simulation models were developed and validated by comparing the damage modes and crashworthiness indicators with the dedicated experimental study. Second, the interactive effects of different configuration hybrid tubes were investigated by analyzing the discrepancies in the deformation pattern and internal energy absorption of each material through the validated simulation models. The test results show that the greatest energy absorption occurs in the Al-Ko model of 7401.4 J. This hybrid crash box has an energy absorption value of 11% greater compared to the sum of the energy absorption of aluminum tubes (3746.5 J) and composite tubes (2923.4 J).*

**Keywords:** Polyester, Vinyl Ester, Cross-linking.

## 1. PENDAHULUAN

Poliester tak jenuh adalah resin termoset yang telah banyak digunakan dalam komponen otomotif, pesawat terbang, konstruksi kapal, dan aplikasi teknik lainnya, karena kekuatan mekaniknya yang cukup baik, warna yang mengkilat, mudah dibentuk dan cukup tahan dengan perubahan cuaca lingkungan <sup>[1,2]</sup>. Disamping kelebihan material ini mempunyai beberapa kelemahan diantaranya kaku, getas dan apabila terkena beban benturan dan pukulan akan mengalami retak yang menjalar <sup>[3,4]</sup>. Hal ini disebabkan karena termoset memiliki struktur jaringan molekul dengan ikatan kovalen yang sangat besar dengan kerapatan rantai silang yang terikat satu sama lain yang saling mengunci, dan sangat sulit untuk terjadi deformasi plastis <sup>[5,6]</sup>. Usaha untuk memperkuat material resin *polyester* ini telah banyak dilakukan salah satunya dengan menambahkan material penguat seperti serat untuk membentuk material komposit. Beberapa jenis penguat misal dengan menambahkan

Corresponding Author:  
✉ **Nusyirwan**  
Received on: 2022-12-08  
Revised on: 2025-01-13  
Accepted on: 2025-01-14

serat karbon, serat glass, serat rami dan sebagainya telah banyak yang mempublikasikannya [7,8]. Selanjutnya penelitian untuk meningkatkan kekuatan mekaniknya seperti meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan impak dan memperbesar harga modulus telah banyak referensi yang mempublisnya [2][3][2]. Pendekatan lain untuk meningkatkan ketangguhan dan sifat elastisitas poliester adalah dengan metose mencegah ikatan rantai molekul poliester agar jangan berhubungan satu sama lainnya yaitu dengan mencampurkan bahan kimia lain yang mampu menghalangi rantai molekul poliester jangan terhubung satu sama lainnya atau mencegah rantai poliester berikatan silang dengan rantai poliester itu sendiri [4].

Penelitian sebelumnya telah dilakukan pada pencampuran poliester dengan *vinyl ester* untuk meningkatkan kekuatan mekaniknya karena kemiripan dari dua struktur rantai termoset ini [9,11,12]. Pada penelitian sebelumnya, belum ada informasi yang melaporkan mengenai peningkatan ketahanan retak terkait pengikatan molekul polimer poliester ini pada penambahan *vinil ester*. Untuk itu akan dilakukan penelitian pada tahap ini, antara lain kemampuan material menahan beban retak dengan mencampur *polyester* dan *vinyl ester* [13,14].

Pada penelitian akan dikaji persoalan rung lingkup pada ketahanan retak material poliester yang memiliki cacat awal untuk menerima beban luar terhadap terhadap kemampuan material ini mempertahankan keretakan dikenal sebagai ketangguhan retak (fracture toughness) dan dicirikan oleh faktor intensitas tegangan kritis (K1c) [15,16]. Namun hipotesis tentang mekanisme ketangguhan retak pada poliester termoset yang diperkuat dengan campuran *vinil ester* dan penambahan MMA masih belum diketahui secara pasti.

## 2. METODE DAN BAHAN

### 2.1. Bahan

Hipotesis yang dikembangkan pada penelitian ini adalah bahwa ketangguhan poliester terhadap perambatan retak akibat beban eksternal yang bekerja pada polimer sangat bergantung pada persentase komposisi campuran poliester dan *vinil ester*. Ini adalah merupakan kajian utama dalam penelitian dari penelitian ini. Poliester tak jenuh merupakan polimer yang umum digunakan sebagai bahan dasar pembuatan matriks komposit karena bahan ini banyak digunakan dalam bidang teknik rekayasa terutama pada komponen kendaraan, badan kapal wisata, dan sayap pesawat ringan. Poliester merupakan polimer yang umum digunakan sebagai bahan dasar pembuatan material matrik komposit karena bahan ini banyak digunakan dalam bidang teknik, Berikut beberapa sifat dari poliester Dengan produknya, Yukalac 1560 BL-EX [13] [20] oleh P.T. Kimia Alfa, SG= 1,1 g/cm<sup>3</sup> pada 25°C dan  $\mu=y$  4,5-5,0 poise pada 24 °C), *vinil ester* (RYPOXY R-802 EX-1, S G= 1,05 g/cm<sup>3</sup> pada 24 °C), metil metakrilat (MMA), dan metil etil keton peroksida sebagai katalis [1][5].

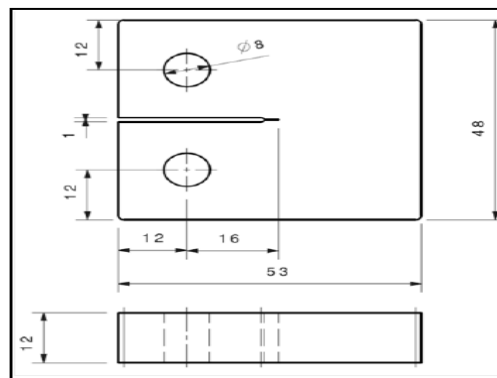
Selain *polyester*, dalam penelitian ini digunakan jenis polimer lain untuk penelitian adalah *vinyl ester*. *Vinyl ester* memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan polimer lainnya [6]. *Vinyl ester* merupakan salah satu polimer yang memiliki kinerja yang tinggi dan sifat mampu proses yang baik untuk meningkatkan sifat mekanik suatu unsur paduan, sehingga *vinyl ester* dapat *Vinyl ester* memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan polimer lainnya [6]. *Vinyl ester* merupakan salah satu polimer yang memiliki kinerja yang tinggi dan sifat mampu proses yang baik untuk meningkatkan sifat mekanik suatu unsur paduan, sehingga *vinyl ester* dapat digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik pada paduan *polyester*. Peningkatan sifat mekanik pada polimer blend akan berhubungan dengan persentase paduan. Informasi untuk nilai kekuatan bending dari polimer blend dari paduan *polyester* dan *vinyl ester* belumlah banyak informasi yang mengkajinya [18,19].

*Methyl methacrylate* disingkat dengan MMA merupakan bahan polimer yang memiliki sifat *biocompatible*, di mana menjadikan MMA sebagai bahan penelitian dalam studi literatur material biomedis. Molekul MMA yang tergabung dalam rantai ikatan mengarah pada jarak antar ikatan pada ikatan *polyester*, sehingga kekakuan dari struktur jaringan *polyester* berkurang. MMA merupakan material polimer tidak berwarna dan memiliki biaya yang relatif murah. Keuntungan penambahan MMA terhadap suatu paduan adalah menghasilkan material yang bersifat *non-toxicity*, biaya yang relatif lebih rendah, kemudahan dalam proses, kompatibilitasnya, dan dapat digunakan untuk pengolahan material yang memiliki resistansi fracture yang besar. Pencampuran MMA terhadap thermosetting resins dapat menurunkan viskositas dari polimer blend. Penambahan MMA di sini diharapkan biasa membuat struktur jaringan dari *polyester* menjadi homogen. Pada penelitian sebelumnya, didapatkan peningkatan harga dampak pada penambahan 10% MMA [5][1][7].

Catalyst MEKP adalah katalis yang digunakan adalah *catalyst Mepoxe* produksi PT. Justus Kimiaraya. Fungsi *catalyst* adalah sebagai katalisator untuk mempercepat laju pengeringan pada *polyester*. Penggunaan *catalyst* adalah sebesar 4% terhadap paduan *polyester* [6][8].

## 2.2. Preparasi Bahan Baku

Material polimer poliester (UP), *vinyl ester* (VE), dan MMA dicampur dan diaduk dengan komposisi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Perbandingan masing-masing bahan dilakukan sesuai dengan penelitian sebelumnya [1][9]. Agar lebih sempurna, masing-masing campuran dihomogenkan agar komposisinya seragam menggunakan magnetic stirrer selama 10 menit dengan kecepatan 400 rpm dan suhu lingkungan 25 °C. Pengukuran kekentalan masing-masing campuran diukur, kemudian diperoleh MEKP 4%. ditambahkan ke cetakan, dan campuran itu dituangkan ke dalam cetakan berbasis kaca selama kurang lebih 3 hari pada suhu kamar. Dimensi die dibuat sesuai standar ASTM D 5045 yaitu lebar, panjang, dan tebal 53 mm x 48 mm x 12 mm, serta beralur untuk ketangguhan retak [10][11][8]. Perlakuan pencampuran *vinyl ester* terhadap poliester tak jenuh dilakukan dengan perbandingan komposisi sesuai dengan yang ditulis pada Tabel 1.



Gambar 1. Dimensi sampel uji retak menurut standar ASTM D5405 [10][12].

## 2.3. Pengujian Retak Material

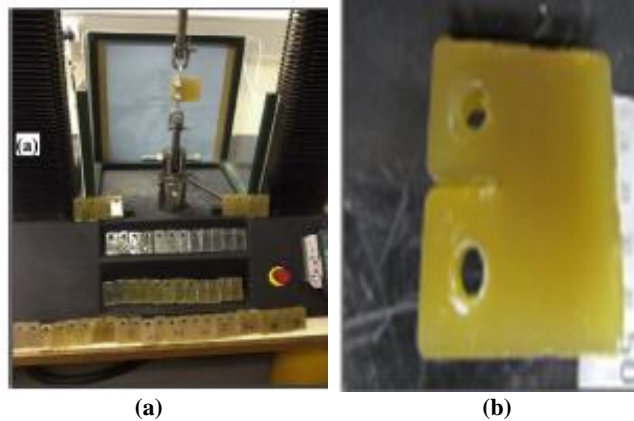
Pengujian retak dilakukan dengan menggunakan mesin uji retak yang bekerja dengan memberikan beban tarik dua sisi berlawanan yaitu arah vertikal ke atas dan ke bawah secara bersamaan dengan menggunakan mesin universal merk COM-TEN [2][15]. Geometri benda

uji yang dibuat mengacu pada dimensi standar sesuai dengan standar ASTM D5405. Dimensi material uji retak harus memenuhi dimensi standar untuk menguji ketangguhan retak akibat peregangan material secara lebih akurat karena menyediakan lebih banyak ruang untuk perambatan retak, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Rasio panjang dan lebar retak ( $a/w$ ) terbatas hingga mendekati nilai rasio=0,5 dan memiliki laju kecepatan penarikan 5 mm/menit. Faktor intensitas tegangan kritis ( $K_{Ic}$ ) dihitung dari setidaknya lima sampel yang diambil nilai rata-ratanya dengan persamaan sebagai berikut :

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{Bw^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \tag{1}$$

Dimana  $K_{Ic}$ , adalah ketangguhan retak material dalam satuan  $MPa.m^{0.5}$ ,  $B$  adalah tebal spesimen dalam mm,  $a$  adalah panjang retak awal dalam mm,  $l$  adalah lebar spesimen dalam mm, sedangkan  $w$  panjang retakan material yang akan mendapat beban eksternal dimana  $w=(l-a)$ , dalam mm [8][13][14]. Selanjutnya besar  $P_Q$  adalah besar beban maksimum yang diperoleh dari kurva yang terbaca pada grafik tampilan mesin uji retak dalam (kN) untuk masing-masing spesimen uji retak. Nilai dari  $K_{Ic}$  menurut dimensi yang diberikan dari gambar benda uji retak dihitung dengan persamaan (1) dan persamaan (2) dengan  $K_{Ic}$  yang harga satuannya dalam  $Mpa.m^{0.5}$ . Perhitungan ketahanan retak untuk  $K_{Ic}$  dihitung dari persamaan (1) dan persamaan (2).

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right) \left\{ 0.886 + 4.64\left(\frac{a}{w}\right) - 13.32\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{w}\right)^4 \right\}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \tag{2}$$



**Gambar 2.** Mesin uji retak Merk COM-TEN 95T Series 5K to crack testing, (a) dan sampel uji retak hasil cetakan, (b)

**Tabel 1.** Komposisi material campuran untuk pembuatan spesimen uji retak.

| MATERIAL No. | UP, VOLUME (%) | VE, VOLUME (%) | MMA, VOLUME (%) | MEKP, VOLUME (%) |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| 1            | 100            | 0              | 10              | 4                |
| 2            | 70             | 30             | 10              | 4                |
| 3            | 30             | 70             | 10              | 4                |
| 4            | 0              | 100            | 10              | 4                |

### 3. HASIL DAN DISKUSI

Pada bagian berikut akan dijelaskan beberapa tahap bahasan sub-bab diantaranya adalah hasil penelitian, analisis data, pembahasan dan kesimpulan.

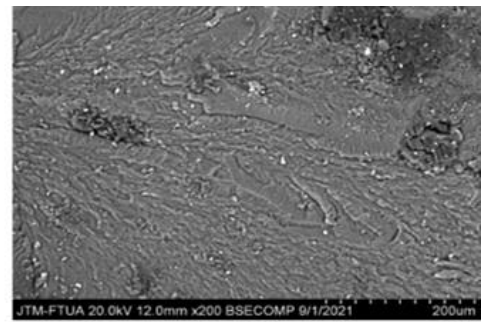
#### 3.1. Karakteristik Permukaan Patahan

Permukaan patahan material sampel yang telah dilakukan uji retak bentuk patahannya diamati di bawah mikroskop elektron model FE-SEM dari JEOL dengan arus percepatan 5 kV dan arus probe 8 mA <sup>[1][15]</sup>. Permukaan patahan dari sampel poliester tak jenuh murni atau tanpa campuran ditunjukkan pada Gambar 3(a), yang memiliki permukaan halus karena material ini mempunyai sifat mekanik dengan katagori ketangguhannya yang rendah permukaan patahannya berbentuk halus sesuai dengan <sup>[12][16]</sup>. Untuk hal yang sama juga ditunjukkan pada Gambar 3(d) yang menggambarkan permukaan patahan dari *vinyl ester* murni, yang memiliki permukaan sedikit lebih kasar dari poliester murni, tetapi masih kelihatan permukaan yang halus masih diklasifikasikan sebagai polimer dengan nilai ketangguhan rendah <sup>[17][18][19]</sup>.

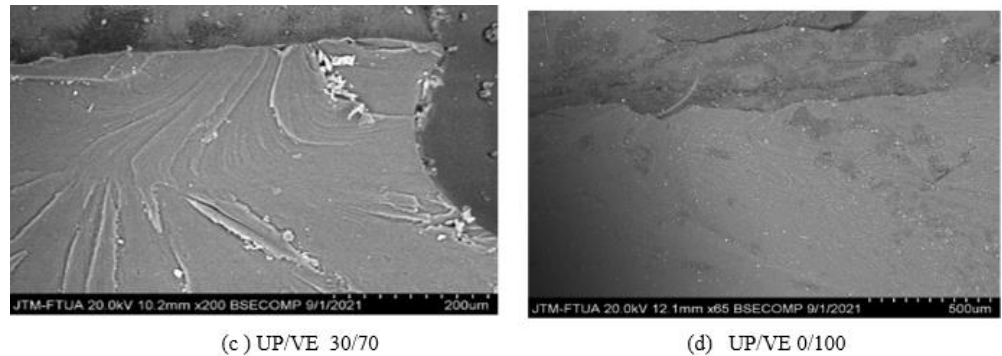
Penambahan campuran vinyl ester (VE) dan MMA pada polimer poliester tak jenuh menghasilkan permukaan patahan yang lebih kasar dan menandakan permukaan retak yang kasar adalah menyatakan bahwa material memberikan perlawanan terhadap beban tarikan yang dilakukan mesin uji retak, ini berarti meningkatnya ketangguhan matrial sehingga diperoleh bentuk patahan yang kasar. Tingkat keadaan ini dapat kita lihat pada Gambar 3(b) yang menggambarkan karakterisasi permukaan retak untuk penambahan *vinyl ester* 30% pada poliester (UP/VE 70 %, 30 %), dengan permukaan retak yang kasar, menunjukkan bahwa telah terjadi deformasi plastis yang cukup bernilai pada material campuran. Di daerah ini, sifat getas poliester dapat dikurangi, sehingga terjadi deformasi plastis. penambahan VE dan MMA pada poliester tak jenuh menghasilkan permukaan yang lebih kasar akibat terjadinya deformasi plastis dan menggambarkan tingkat permukaan retak tertentu. Gambar 3(c) menggambarkan karakterisasi permukaan retakan yang paling kasar untuk penambahan vinil ester sebanyak 70% ke poliester (UP/VE 30 % ,70%). Pada tingkat keadaan ini diperoleh bentuk permukaan yang paling kasar dari semua kelompok jenis sampel uji yang ditunjukkan pada Tabel 1. Permukaan retakan yang sangat kasar memiliki pengertian bahwa telah terjadi pertumbuhan retakan akibat perlawanan yang meningkat dari sampel uji retak yang sangat tangguh yang menghasilkan permukaan yang lebih kasar akibat terjadinya deformasi plastis yang cukup besar <sup>[20][21][8]</sup>.



(a) UP/VE 100/0



(b) UP/VE 70/30



(c) UP/VE 30/70

(d) UP/VE 0/100

**Gambar 3.** Struktur mikro permukaan patahan *polyester* yang dicampur dengan *vinyl ester*. (a) poliester murni. (b) *polyester* 70 % , *vinyl ester* .30 %.,(c) *polyester* 30 % , *vinyl ester* 70 % dan d) *polyester* 0 % , *vinyl ester* 100 %.

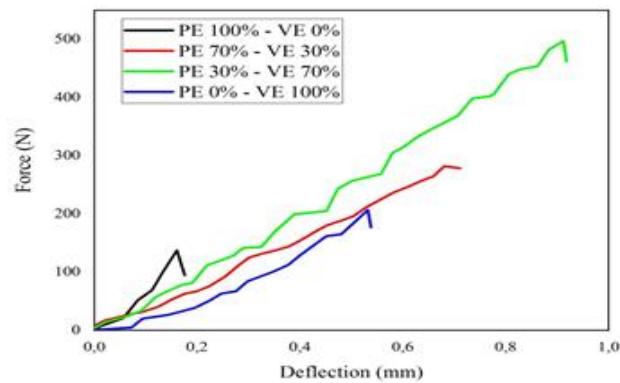
### 3.2. Hasil Pengujian Retak

Pada Tabel 2 dan Gambar 4 menunjukkan besarnya gaya yang diberikan oleh mesin uji retak untuk memberikan gaya agar sampel uji mengalami kegagalan retak atau fraktur untuk masing-masing polimer UP murni, VE murni, dan campuran kedua polimer dengan prosentase campuran UP dan VE sesuai dengan yang ditunjukkan pada Tabel 1. Dari hasil pengujian retak diperoleh, spesimen uji retak menunjukkan perambatan retak yang tidak stabil pada kondisi pembebanan terus menerus, sedangkan beban menurun hingga nol setelah mencapai maksimum, yang menunjukkan bahwa batas elastis material telah mencapai tingkat kegetasan yaitu perlawanan keuletan material telah mencapai batas maksimal. Ini juga menyiratkan bahwa sebagian besar energi dari beban retak diserap pada tahap awal retak bermula atau pada inisiasi retak, sementara lebih sedikit energi yang hilang pada tahap perambatan retak cepat. Setelah beban tarik diterapkan, poliester tak jenuh dicampur dengan (30% volume) *vinyl ester* mengalami perpanjangan (perpindahan) lebih besar dibandingkan dengan UP murni. Hal ini disebabkan oleh retakan yang dimulai pada beban yang diblokkan karena adhesi antarmuka dengan polimer VE dan UP yang terikat baik. Dengan meningkatnya ketahanan retak sampel uji, beban yang diberikan mesin uji retak terus meningkat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Untuk spesimen hingga 70% volume dari *vinyl ester* (VE) ditambahkan ke campuran UP molekul VE tersebar merata pada UP dengan baik dalam matriks UP, ini menunjukkan di ujung lokasi retakan dapat dikurangi konsentrasi tegangan lokal. Kondisi ini menggambarkan campuran VE pada UP dapat mengalangi perambatan retak dengan baik. Hal ini memungkinkan material uji retak dapat menahan beban yang lebih besar dan menghasilkan lebih banyak permukaan retakan <sup>[22][23]</sup>.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian retak spesimen uji retak campuran *polyester* dan *vinyl ester*.

| KOMPISI CAMPURAN UP- VE (%) | SPESIMEN UJI No. | GAYA RETAKAN (kN) | RATA-RATA (kN) | STANDAR DEVIASI |
|-----------------------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|
|                             | 1                | 0,1370            |                |                 |
| 100 – 0                     | 2                | 0,2700            | 0,226          | 0,077           |
|                             | 3                | 0,2700            |                |                 |
|                             | 1                | 0,2820            |                |                 |
| 70 – 30                     | 2                | 0,2500            | 0,362          | 0,164           |
|                             | 3                | 0,5480            |                |                 |

|         |   |        |       |       |
|---------|---|--------|-------|-------|
|         | 1 | 0,5210 |       |       |
| 30 – 70 | 2 | 0,4810 | 0,499 | 0,021 |
|         | 3 | 0,4970 |       |       |
|         | 1 | 0,1780 |       |       |
| 0 – 100 | 2 | 0,2070 | 0,256 | 0,092 |
|         | 3 | 0,3490 |       |       |



**Gambar 4.** Gaya retakan dari material yang berasal dari hasil uji mesin uji retak.

Dari hasil pengujian retak diperoleh besarnya gaya patahan pada masing-masing benda uji campuran *polyester* dan *vinyl ester* lebih besar dari gaya perpatahan *polyester* murni (tanpa campuran) yang hanya sebesar 0,226 kN. Selanjutnya penambahan *vinyl ester* pada *polyester* dapat meningkatkan ketahanan retak material. Selanjutnya dari hasil uji retak dengan campuran *polyester* dan *vinyl ester* dengan (VE = 70%) ditunjukkan pada Tabel 2. diperoleh adalah besarnya gaya retak sebesar 0,449 kN ( diperoleh peningkatan 198,72 %).

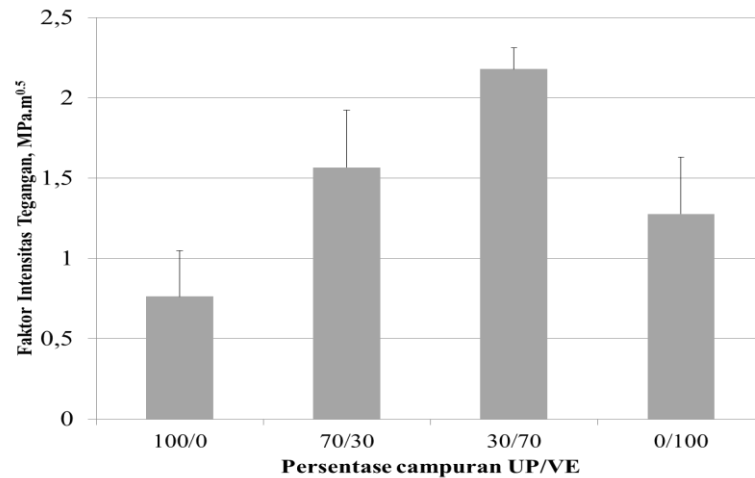
### 3.3. Faktor Intensitas Tegangan

Faktor intensitas tegangan (K1c) sampel uji retak campuran *polyester* dan *vinyl ester* dilakukan pengujian retak terhadap besarnya beban retak dengan menggunakan *crack testing machine* (CT). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, spesimen CT dibuat sesuai dengan dimensi standar uji retak dengan ASTM D5045. Kecepatan gerakan untuk menerapkan gaya pada sampel uji adalah 5 mm/menit, dan hubungan berikut digunakan untuk mengukur Gambar 4, menunjukkan kurva beban-retak yang diperoleh dari hasil pengujian retak mesin uji retak CT untuk berbagai persentase campuran *polyester* dan *vinyl ester*. Semua sampel mengalami perambatan retak yang berbeda tergantung dari persentase campurannya. Sebelum beban maksimum, kurva cenderung membentuk garis lurus yang bergerigi menunjukkan adanya perlawanan dari material sampel uji seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.

Pada Tabel 3 dan Gambar 6, besarnya K1c akan tergantung dari jumlah *vinyl ester* yang dicampurkan pada *polyester*, faktor ini akan meningkatkan nilai faktor intensitas tegangan sesuai dengan meningkatnya jumlah *vinyl ester* yang ditambahkan. Pada saat penambahan *vinyl ester* 70% didapatkan K1c tertinggi = 2,179 N.mm 0.5, meningkat 286% dibandingkan *polyester* tak jenuh murni hanya K1c = 0,762 N.mm 0.5. Pengaruh penggabungan kedua polimer tersebut dapat meningkatkan ketangguhan retak poliester murni <sup>[12]</sup>.

**Tabel 3.** Hasil perhitungan faktor intensitas tegangan campuran poliester dan *vinyl ester*.

| PERSENTASE UP - VE (%) | SPEKIMEN | $K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> ) | RATA-RATA | STANDAR DEVIASI |
|------------------------|----------|----------------------------------|-----------|-----------------|
| 100 – 0                | 1        | 0,434                            | 0,762     | 0,285           |
|                        | 2        | 0,949                            |           |                 |
|                        | 3        | 0,904                            |           |                 |
| 70 – 30                | 1        | 1,383                            | 1,566     | 0,584           |
|                        | 2        | 1,095                            |           |                 |
|                        | 3        | 2,220                            |           |                 |
| 30 – 70                | 1        | 2,045                            | 2,179     | 0,133           |
|                        | 2        | 2,311                            |           |                 |
|                        | 3        | 2,182                            |           |                 |
| 0 – 100                | 1        | 0,969                            | 1,277     | 0,527           |
|                        | 2        | 0,977                            |           |                 |
|                        | 3        | 1,885                            |           |                 |

**Gambar 5.** Faktor intensitas tegangan terhadap prosentase campuran.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini melaporkan keberhasilan penentuan komposisi yang tepat dari campuran polimer berbahan poliester tak jenuh dengan penambahan *vinyl ester* untuk meningkatkan kegetasan poliester menjadi bahan yang keras. Dengan adanya penelitian ini maka keteknikan di bidang engineering khususnya di bidang bahan baku komponen kendaraan sangat terbantu. Campuran *polyester* dengan 70% *vinyl ester* memiliki faktor intensitas tegangan tertinggi ini dapat disimpulkan bahwa *vinyl ester* alam penerapannya sangat mampu meningkatkan kekuatan retak yang baik dari polimer *polyester*. Besarnya  $K_{Ic}$  akan tergantung dari jumlah *vinyl ester* yang dicampurkan pada *polyester*, faktor ini akan



meningkatkan nilai faktor intensitas tegangan sesuai dengan meningkatnya jumlah vinyl ester yang ditambahkan. Pada saat penambahan *vinyl ester* 70% didapatkan  $K1c$  tertinggi = 2,179 N.mm 0.5, meningkat 286% dibandingkan *polyester* tak jenuh murni hanya  $K1c$  = 0,762 N.mm 0.5 . Pengaruh penggabungan kedua polimer tersebut dapat meningkatkan ketangguhan retak poliester murni karena adanya gangguan simpul tautan rantai UP, yang menyebabkan penurunan kekakuan struktural dan peningkatan area deformasi plastik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nusyirwan, H. Abral, M. Hakim, and R. Vadia, “*The potential of rising husk fiber/native sago starch reinforced biocomposite to automotive component,*” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 602, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/602/1/012085.
- [2] A. A. H.Setiawan, D.Ariawan, K.Amri, A.Nuramal, “Pengaruh Perlakuan Alkali Terhadap Sifat Fisis dan Mekanis Serat Lantung (*Artocarpus Elasticus*),” *Rekayasa Mesin*, vol. 13,No.3, no. August 2021, pp. 675–688, 2022.
- [3] K. Anuar and A. Susilawati, “Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKS) Sebagai Material alternatif Dalam Pembuatan Badan Wahana Terbang Tipe Fixed Wing Atha Mapper 2150,” *Rekayasa Mesin*, vol. 12, No.2, no. February, pp. 609–617, 2022.
- [4] Q. Meng and T. Wang, “*An improved crack-bridging model for rigid particle-polymer composites,*” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 211, no. January, pp. 291–302, 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.02.028.
- [5] N. Adnand, R. Mutya, F. Ridwan, H. Abral, H. Dahlan, and E. Satria, “Pengaruh Variasi Persentase Campuran *Polymer Polyester* dan *Vinyl Ester* Terhadap Kekuatan Tegangan Lentur,” *Met. J. Sist. Mek. dan Termal*, vol. 5, no. 2, p. 126, 2021, doi: 10.25077/metal.5.2.126-131.2021.
- [6] and A. M. T. A. S. A. N. Mohammed, E.S Zainudin, S. M. Sapuan, M. D. Azaman, “*Introduction to Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites,*” Elsevier Ltd, 2018.
- [7] A. Osei Bonsu, W. Liang, C. Mensah, and B. Yang, “*Assessing the mechanical behavior of glass and basalt reinforced vinyl ester composite under artificial seawater environment,*” *Structures*, vol. 38, no. January, pp. 961–978, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.02.053.
- [8] N. Nusyirwan and S. Ilham, “*Study of Improving Fracture Toughness of Un-Saturated Polyester with Addition of Mixing Percentage of CPO Oils,*” vol. 2, pp. 132–137, 2022.
- [9] V. Fiore, L. Calabrese, T. Scalici, P. Bruzzaniti, and A. Valenza, “*Experimental design of the bearing performances of flax fiber reinforced epoxy composites by a failure map,*” *Compos. Part B Eng.*, vol. 148, no. February, pp. 40–48, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.044.
- [10] a Standard, “*Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials,*” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 99, no. Reapproved, pp. 1–9, 1996, doi: 10.1520/D5045-99R07E01.2.
- [11] A. Mahyudin, S. Arief, H. Abral, Emriadi, M. Muldarisnur, and M. P. Artika, “*Mechanical properties and biodegradability of areca nut fiber-reinforced polymer blend composites,*” *Evergreen*, vol. 7, no. 3, pp. 366–372, 2020, doi: 10.5109/4068618.

- [12] D. Frómata et al., “*Identification of fracture toughness parameters to understand the fracture resistance of advanced high strength sheet steels*,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 229, no. February, p. 106949, 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.106949.
- [13] E. Klyatskina, O. Sahuquillo, A. Sánchez, F. Segovia, and V. Stolyarov, “*Interlaminar fracture toughness of low curing temperature vinylester composites exposed to severe service conditions*,” *Mater. Lett.*, vol. 300, p. 130129, 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2021.130129.
- [14] A. T. Seyhan, M. Tanoğlu, and K. Schulte, “*Tensile mechanical behavior and fracture toughness of MWCNT and DWCNT modified vinyl-ester/polyester hybrid nanocomposites produced by 3-roll milling*,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 523, no. 1–2, pp. 85–92, 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.05.035.
- [15] N. Adnan, H. Abral, D. H., and E. Staria, “*Identification of Mechanical Strength for Mixture of Thermoset Polyester with Thermoset Vinyl Ester due to Bending Load*,” *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 6, no. 1, pp. 19–25, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v6i1.14450.
- [16] G. R. Arpitha, M. R. Sanjay, and B. Yogesha, “*Review on Comparative Evaluation of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*,” *Adv. Eng. Appl. Sci. An Int. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 44–47, 2014.
- [17] C. V. Opelt, G. M. Cândido, and M. C. Rezende, “*Fractographic study of damage mechanisms in fiber reinforced polymer composites submitted to uniaxial compression*,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 92, no. June, pp. 520–527, 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.06.009.
- [18] H. Ardhyanta et al., “*Mechanical and Thermal Properties of Unsaturated Polyester/Vinyl Ester Blends Cured at Room Temperature*,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 202, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/202/1/012088.
- [19] B. Xie, C. Li, B. Zhang, L. Yang, G. Xiao, and J. Chen, “*Evaluation of stearic acid/coconut shell charcoal composite phase change thermal energy storage materials for tankless solar water heater*,” *Energy Built Environ.*, vol. 1, no. 2, pp. 187–198, 2020, doi: 10.1016/j.enbenv.2019.08.003.
- [20] M. T. Albdiry and B. F. Yousif, “*Toughening of brittle polyester with functionalized halloysite nanocomposites*,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 160, no. October 2018, pp. 94–109, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.032.
- [21] K. Liu, S. He, Y. Qian, Q. An, A. Stein, and C. W. Macosko, “*Nanoparticles in Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites: Comparing Toughening Effects of Modified Graphene Oxide and Core-Shell Rubber*,” *Polym. Compos.*, vol. 40, no. S2, pp. E1512–E1524, 2019, doi: 10.1002/pc.25065.
- [22] M. T. Albdiry, B. F. Yousif, and H. Ku, “*Fracture toughness and toughening mechanisms of unsaturated polyester-based clay nanocomposites*,” *13th Int. Conf. Fract. 2013, ICF 2013*, vol. 5, pp. 3446–3455, 2013.
- [23] P. K. Naik, N. V. Londe, B. Yogesha, L. Laxmana Naik, and K. V. Pradeep, “*Mode I Fracture Characterization of Banana Fibre Reinforced Polymer Composite*,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 376, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/376/1/012041.